

Induktive Entfernungsmessverfahren zur Positionsbestimmung von Flutschutztoren

Jan Thies

Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Berliner Tor 5, 20099 Hamburg, Deutschland
jan.thies@haw-hamburg.de

Abstract. Die präzise Positionsbestimmung von Flutschutztoren ist ein wichtiger Baustein des Hochwasserschutzes Hamburger Hafen. Diese Arbeit untersucht den Einsatz induktiver Sensoren zur Überwachung der Position solcher Tore. Induktive Sensoren sind aufgrund ihrer Fähigkeit, metallische Objekte präzise zu detektieren, besonders für diese Aufgabe geeignet. Im Rahmen dieser Studie werden verschiedene induktive Sensoren hinsichtlich ihrer Leistungsmerkmale, wie Messgenauigkeit, Detektionsdistanz, und ihrer Resilienz gegenüber Umwelteinflüssen, verglichen. Die Analyse basiert auf einer kleinen Marktübersicht und dem Vergleich spezifischer Sensormodelle, die für den Einsatz im Projekt Rescue-Mate relevant sein könnten. Die Ergebnisse zeigen, dass unterschiedliche Sensoren je nach Anforderung geeignet sein können, wobei eine detaillierte Evaluierung in spezifischen Anwendungsszenarien erforderlich ist, um die optimalen Sensoren für die Überwachung der Flutschutztore zu bestimmen. Diese Arbeit liefert eine fundierte Grundlage für die Auswahl und Implementierung von induktiven Sensoren im Hochwasserschutzkontext.

Keywords: Positionsbestimmung · Induktive Sensoren · IoT · Hochwasserschutz · Rescue-Mate

1 Einleitung

Hamburg ist die zweitgrößte Stadt Deutschlands und liegt direkt an der Elbe, welche in die Nordsee mündet. Der Tiedehub sorgt abwechselnd für sinkende und steigende Pegelstände der Elbe, was im Hamburger Hafen zwar deutlich zu spüren ist, allerdings keine größeren Probleme hervorruft. Im Falle einer Sturmflut, welche bereits vorliegt, wenn der Pegelstand 150cm über dem mittleren Hochwasser steht, kann es zu Überschwemmungen in einigen Teilen des Hafens kommen [8]. Deiche und Spundwände halten das Wasser aus tiefliegenden Bereichen fern, in denen immerhin ca. 180.000 Menschen leben und Güter im zweistelligen Milliardenbereich lagern [9]. Flutschutztore sind notwendig, um die tiefliegenden Bereiche erreichbar zu machen. Als Teil des Rescue-Mate Projektes sollen Flutschutztore im Hamburger Hafen mit Sensortechnik ausgestattet werden, um überwachen zu können, ob ein Tor jeweils geschlossen oder geöffnet ist [7].

Ziel dieser Arbeit ist es, einen Überblick über induktive Sensoren zu erhalten. Mithilfe induktiver Sensortechnik kann die Position eines metallenen Gegenstandes relativ genau bestimmt werden, weshalb sich diese Art der Sensortechnik in der Theorie für die Positionsbestimmung von Flutschutztoren eignet. Der Fokus liegt hierbei auf dem Vergleich verschiedener induktiver Sensoren untereinander hinsichtlich verschiedener Leistungsmerkmale. Die konkrete Verwendung dieser Sensoren wird explizit nicht betrachtet. Weiter ist auch ein Vergleich mit anderen Methoden zur Positionsbestimmung kein Teil dieser Arbeit. Die Verarbeitung und das Weiterleiten der Daten ist auch kein Teil dieser Arbeit.

Für einen Vergleich verschiedener Sensoren müssen zuerst geeignete Merkmale ausgewählt werden, anhand derer die Sensoren verglichen werden. Für die Auswahl geeigneter Merkmale ist der Projektkontext relevant, weshalb zuerst eine kurze Übersicht über das Projekt und die die grundlegende Funktionsweise induktiver Sensoren beschrieben werden. Nach der Auswahl geeigneter Merkmale werden einige Sensoren vorgestellt, welche grundsätzlich in Frage kommen. Anschließend werden die aufgeführten Sensoren hinsichtlich der relevanten Merkmale miteinander verglichen und bewertet.

2 Grundlagen

2.1 Rescue-Mate

Das Rescue-Mate Projekt ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördertes Projekt. Ziel ist es, Informationen zusammenzutragen und bereitzustellen, welche bei der Erstellung eines Lagebildes im Katastrophenfall, vorrangig eines Hochwassers, helfen sollen. Dies soll mithilfe einer gemeinsamen Datenplattform geschehen, auf der u.a. IoT-Sensordaten wie Wasserstände oder Statusinformationen von Flutschutztoren zusammengeführt und für Einsatzkräfte zur Verfügung gestellt werden [7].

Speziell im Kontext von Flutschutztoren stellt sich die Frage, ob diese geschlossen oder geöffnet sind. Polder, dies sind Bereiche im Hamburger Hafen, die häufig als Erweiterungsfläche im Hafen für Lagerhäuser oder andere Infrastruktur genutzt werden, sind durch Flutschutztore und Spundwände vor dem Eindringen von Salzwasser der Elbe geschützt. Sollte ein Flutschutztor nicht korrekt geschlossen sein, sind betroffene Bereiche nicht effektiv gegen Hochwasser geschützt [8].

2.2 Elektromagnetische Induktion

Elektromagnetische Induktion ist das zugrundeliegende Prinzip, welches für induzierte Spannungen und induzierte Ströme verantwortlich ist. Dies kann geschehen, indem ein elektrischer Leiter sich in einem sich verändernden Magnetfeld befindet oder indem ein elektrischer Leiter selbst durch ein sich nicht veränderndes Magnetfeld bewegt wird [18, S. 913]. Beschrieben werden kann die elektromagnetische Induktion mithilfe des Faradayschen Gesetzes, aus welchem hervorgeht, dass induzierte Spannung proportional zur Änderungsrate des magnetischen Flusses

ist. Der magnetische Fluss ergibt sich aus der Magnetfeldstärke und Fläche, die Senkrecht zu den Feldlinien steht [18, S. 915]. Allgemein hin wird diese Beziehung wie folgt ausgedrückt:

$$U_{\text{induziert}} = - \frac{d\Phi_{\text{mag}}}{dt} \quad (1)$$

wobei $U_{\text{induziert}}$ die induzierte Spannung und $-\frac{d\Phi_{\text{mag}}}{dt}$ die Änderung des magnetischen Flusses beschreibt [18, S. 915].

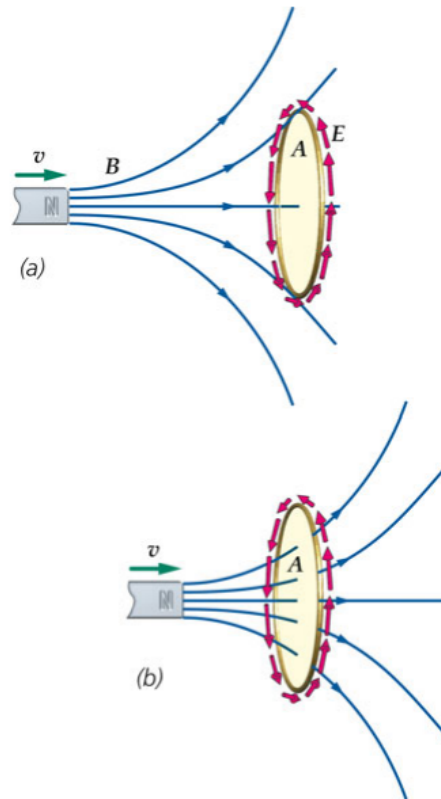


Fig. 1. Visualisierung des magnetischen Flusses, welcher eine Spannung in einer Leiterschleife induziert [18, S. 916]

In Abbildung-1 sind die von einem Permanentmagneten ausgehenden magnetischen Feldlinien zu sehen. Aus der Bewegung des Permanentmagneten in Richtung der Leiterschleife folgt, dass mehr magnetische Feldlinien die eingeschlossene Fläche der Leiterschleife durchkreuzen. Die Änderung in der Anzahl der die Fläche kreuzenden Feldlinien, repräsentiert eine Zunahme des Magnetfeldes, wodurch eine Spannung in der Leiterschleife induziert wird [18, S. 915f.].

2.3 Abstands- und Positionsbestimmung

Die Abstands- und Positionsbestimmung ist ein wesentlicher Aspekt in vielen technischen Anwendungen, insbesondere in der Automatisierung und Robotik. Unterschiedliche Sensortechnologien ermöglichen es, Distanzen präzise zu messen und Positionen von Objekten zu bestimmen. Grundsätzlich lassen sich Sensoren zur Abstands- und Positionsbestimmung in folgende Kategorien einteilen: optische Sensoren, akustische Sensoren, induktive Sensoren und kapazitive Sensoren [21].

Laser Sensoren sind teil der Gruppe von optischen Sensoren und verwenden einen Laserstrahl, um die Entfernung eines Objekts zu messen, indem die Zeit gemessen wird, die das Licht benötigt, um das Objekt zu erreichen und zurückzukehren. Diese Methode, auch als Time-of-Flight (ToF) bekannt, bietet eine hohe Messgenauigkeit und eignet sich besonders für die präzise Bestimmung von Positionen. Eine Herausforderung bei Lasersensoren besteht jedoch in der Empfindlichkeit gegenüber Umgebungslicht und der Notwendigkeit einer klaren Sichtlinie zwischen Sensor und Objekt [12].

In der Gruppe akustischer Sensoren lassen sich Ultraschallsensoren wiederfinden. Sie funktionieren durch das Aussenden von Schallwellen, die von einem Objekt reflektiert werden. Die Zeit, die die Schallwellen für den Weg hin und zurück benötigen, wird gemessen, um die Entfernung zu berechnen. Diese Sensoren sind kostengünstig und robust, allerdings können sie durch Umgebungsgeräusche gestört werden, und ihre Genauigkeit nimmt mit zunehmender Entfernung ab. Darüber hinaus ist ihre Auflösung in der Regel geringer als die von Lasersensoren [10].

Kapazitive Sensoren messen Abstände, indem sie die Änderung in der Kapazität eines elektrischen Feldes erfassen, wenn sich ein Objekt nähert. Diese Sensoren sind besonders gut geeignet für die Detektion von Objekten, die nahe an der Sensoroberfläche liegen, und können auch nichtmetallische Materialien erkennen. Sie sind jedoch empfindlich gegenüber Umgebungsbedingungen wie Feuchtigkeit und Temperaturschwankungen [20].

Zusammenfassend bieten verschiedene Sensortechnologien unterschiedliche Vorteile und Herausforderungen in der Abstands- und Positionsbestimmung. Die Wahl des geeigneten Sensors hängt stark von der spezifischen Anwendung und den Umgebungsbedingungen ab [?].

2.4 Induktive Sensoren

Induktive Sensoren können die Präsenz oder Entfernung von metallischen Objekten detektieren. Dies geschieht mithilfe eines elektromagnetischen Feldes, welches durch den Sensor erzeugt und durch das zu detektierende Objekt verändert wird. Die Präsenz eines metallischen Objektes innerhalb des erzeugten elektromagnetischen Feldes wirkt sich auf die Impedanz der Spule aus, welche das elektromagnetische Feld erzeugt. Diese Veränderung in der Impedanz kann gemessen werden und daraus die Präsenz oder Entfernung eines metallenen Objektes abgeleitet werden [11].

Die grundlegende Funktionsweise eines induktiven Sensors ist in Abbildung-2 skizziert. Auf der rechten Seite der Abbildung ist die Schaltlogik zu erkennen, welche die Unterschiede in der Impedanz der Spule misst. Darüber hinaus sind die Spulen zur Erzeugung des elektromagnetischen Feldes, sowie ein metallenes Objekt erkennbar [22].

In Abbildung-2 ist außerdem zu erkennen, dass es eine Distanz größer null gibt, in der die Präsenz eines metallenen Objektes detektiert werden kann. Die Berührungsfreie Detektion erlaubt eine verschleißfreie Detektion, welche zur Langlebigkeit der Sensoren beitragen [15].

Gleichzeitig folgt hieraus, dass sich induktive Sensoren hinsichtlich ihrer Messgenauigkeit und Detektionsentfernung, sowie dem maximalen Versatz, den ein zu detektierender Gegenstand besitzen darf, unterscheiden. Induktive Sensoren erreichen hier Genauigkeiten im Mikrometerbereich und Detektionsentfernungen im Zentimeterbereich, wobei mit bestimmten Herangehensweisen Positionsänderungen im Nanometerbereich erzielt werden können. Es muss beachtet werden, dass mit herkömmlichen Methoden nur leitende Materialien erkannt werden können [16].

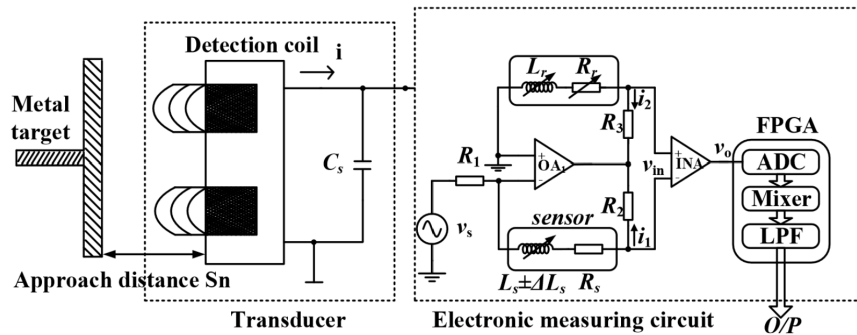


Fig. 2. Skizze eines induktiven Sensors zur Messung von Abständen [22]

3 Forschungsstand

Die Entwicklung und Anwendung von Sensoren zur berührungslosen Abstands- und Positionsbestimmung ist ein breit erforschtes Gebiet, das in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht hat. Insbesondere induktive Sensoren haben in industriellen Anwendungen, etwa in der Automatisierungstechnik, der Robotik und der Fertigung, einen festen Platz gefunden. Die Fähigkeit dieser Sensoren, metallische Objekte präzise zu detektieren und deren Position zu bestimmen, macht sie zu einer unverzichtbaren Komponente in zahlreichen Systemen.

Volpe et. al untersuchen in [19] verschiedene Methoden zur Positionsbestimmung, darunter auch induktive Sensoren. Der Kontext der Untersuchung sind die Anwendung der Sensorik im Weltraum. Zwar lassen sich die Leistungsmerkmale untersuchten Sensoren nur bedingt auf die Gegenwart übertragen, die Gegenüberstellung verschiedener Sensortypen ist allerdings vor dem Hintergrund des angesprochenen Projektes unabdingbar, um die richtige Messmethodik zu wählen.

Konkret im Bereich induktiver Sensoren werden nach wie vor neue Sensoren entwickelt. Farsi et. al entwickeln in [11] einen induktiven Sensor, der einerseits wenig Energie verbraucht und andererseits eine hohe Präzision bietet. Des Weiteren wird ein Vergleich mit anderen aktuellen induktiven Näherungssensoren vollzogen, um die Messgenauigkeit des Sensors zu unterstreichen.

Konträr dazu entwickeln Kejik et. al in [13] zwar ebenfalls einen induktiven Näherungssensor, der Fokus wird allerdings auf die Reduktion von Stückkosten und geringe Abweichungen bei Temperaturschwankungen gelegt. Es konnte eine Genauigkeit von 120 Nanometern im Nahbereich des Sensors erreicht werden. Eine ähnliche Genauigkeit erreichten auch Leons et. al in [14].

Es lässt sich festhalten, dass nach wie vor induktive Sensoren mit sehr speziellen Anforderungen für konkrete Kontexte entwickelt werden, wobei die Art und Weise des Detektionsmechanismus eine entscheidende Rolle in der erreichten Leistung spielt [16].

4 Analyse

4.1 Methodik

Es soll eine bessere Übersicht über den Themenkomplex induktiver Sensoren erlangt werden. Hierfür wird in erster Linie eine Marktanalyse durchgeführt, auf dessen Basis eine Auflistung aktueller und bewährter induktiver Sensoren erstellt wird. Die identifizierten Sensoren werden anschließend anhand ausgewählter Kriterien miteinander verglichen, um eine Bewertung hinsichtlich der Praxis-tauglichkeit formulieren zu können.

4.2 Kriterienauswahl

Vor dem Projekthintergrund ist ein gewisses Maß an Genauigkeit nötig. Die Durchflussmenge an Wasser bei bestimmten Spaltmaßen des Flutschutztores zu bestimmen und in Relation zur maximalen Wasserentsorgung durch eventuelle Pumpen im gefährdeten Bereich zu setzen übersteigt den Kontext dieser Arbeit. Da ohne weiteres kein konkreter Grenzwert bestimmt werden kann, sollen die *Messgenauigkeiten* der Sensoren festgehalten und verglichen werden, wobei mehr Genauigkeit als besser anzusehen ist. Da es sich um verschiedene Flutschutz-tore handelt, welche sich in ihrer Bauweise unterscheiden, ist unklar, wo genau ein Sensor installiert werden kann, ohne dass mit Beschädigung durch Hafetrieb

oder andere Einflüsse gerechnet werden muss. Daraus ergibt sich, dass die maximale *Messdistanz* von Relevanz ist. Da die Sensoren draußen und im Hafen eingesetzt werden, muss eine gewisse *Resilienz* gegenüber Umwelteinflüssen vorhanden sein. Da eine autarke Stromversorgung für den Betrieb der Sensorboxen angedacht ist, muss die Art der *Stromversorgung* betrachtet werden. Es muss unterschieden werden, ob es sich um einen *Schalt- oder Messsensor* handelt. *Stückkosten* sollten der Vollständigkeit halber aufgenommen werden.

4.3 Sensorauswahl

Die Auswahl der in dieser Arbeit betrachteten Sensoren besteht teilweise aus Sensoren, welche im Kontext des genannten Projektes bereits bestellt und dadurch im Büro zur Verfügung standen. Des Weiteren wurden ähnliche Sensoren gesucht, wobei der Fokus auf den Produkten anderer Hersteller lag, um eine vielfältige Auswahl an Sensoren zu betrachten

4.4 Vergleich

Nachfolgend werden die im vorangegangenen Kapitel genannten Eigenschaften der einzelnen Sensoren dargelegt. Die Informationen lassen sich in den jeweiligen Datenblättern der Sensoren finden.

Sensor	Preis	Typ	Distanz	Genauigkeit	Stromversorgung	Resilienz
SICK, Inc. 1072813 [5]	ca. 40€	Schaltensor	8mm	2%	10V bis 30V	IP69K
Molex 1202530173 [17]	ca.145€	Messsensor	0mm bis 10mm	n/a	10V bis 30V	IP67
MikroElektronika MIKROE-4783 [6]	ca. 37€	Messsensor	n/a	24bit Auflösung	5V	keine / PCB
Panasonic GX-FL15AI [3]	ca. 40€	Schaltensor	6,7mm	8%	12V bis 24V	IP68
Pepperl+Fuchs 3RG4012 [1]	ca. 50€	Schaltensor	2mm	0,10 mm	15V bis 34V	IP67
ifm IF5278 [4]	ca. 45€	Schaltensor	4mm	10%	18V bis 36V	IP67
Hans Turck BI5U-M18-AP6X-H1141 [2]	ca. 90€	Schaltensor	5mm	2%	10V bis 30V	IP68

Table 1. Leistungsmerkmale ausgewählter induktiver Sensoren

Sensoren zwei und drei sind Messsensoren und besitzen daher eine größere Flexibilität als einfache Schaltsensoren. Dies sorgt allerdings auch für einen höheren Aufwand bei der Kalibrierung und Datenauslese im Vergleich zu den Schaltsensoren.

In Bezug auf die Distanz lässt sich beobachten, dass alle Sensoren eine maximale Distanz von unter einem Zentimeter bedienen. Zwar ist die Genauigkeit relativ hoch, die fehlende Distanz sorgt allerdings dafür, dass die Sensoren tendenziell sehr exponiert angebracht werden müssen, um sinnvolle Messwerte erheben zu können.

Sensoren zwei, fünf und sechs sind für den Projektkontext allerdings tendenziell ungeeignet, da aufgrund der IP67 Zertifizierung, nur ein temporäres Verweilen unter Wasser möglich ist.

5 Diskussion

Bei der Auswahl der Kriterien wurden einige Behauptungen hinsichtlich des Einsatzes der Sensoren getätigt. Um eine umfassendere Auswahl an Kriterien zu gewährleisten, müsste der Sensor in Kombination des Gesamtsystems, welches für die Datenverarbeitung zuständig ist, betrachtet werden.

Die Auswahl der in Frage kommenden Sensoren geschah nur in Teilen strukturiert. Eine geordnetere Herangehensweise würde z.B. die Produktkataloge führender Hersteller induktiver Sensortechnik durchsehen und dabei einer vorher festgelegten Methodik folgen, um für vergleichbarere und nachvollziehbarere Ergebnisse zu sorgen.

Die Evaluation bezog sich ausschließlich auf im Datenblatt genannte Leistungsdaten. Ein standardisierter Testaufbau könnte für belastbarere Ergebnisse sorgen. Dies wäre allerdings mit einem erheblichen Mehraufwand verbunden. Ein Kompromiss könnte sein, eine grobe Auswahl anhand der in den Datenblättern genannten Leistungsdaten vorzunehmen und nachfolgend die Sensoren in einem Teststand zu testen.

Im Rahmen einer Feldstudie könnten beispielhafte Geometrien von Flutschutzoren erhoben werden. Die zu evaluierenden Sensoren könnten im Kontext dieser Geometrien auf ihre Tauglichkeit geprüft werden. Zwar lässt sich so immer noch keine allgemeine Aussage darüber treffen, ob ein konkreter Sensor die richtige Wahl ist. Ist ein Sensor allerdings für verschiedene Szenarien ungeeignet, so ist die Ausmusterung pragmatisch und nachvollziehbar.

6 Fazit

Anfänglich wurde ein Projektkontext beschrieben und die physikalischen Grundlagen induktiver Messtechnik erläutert. Im Rahmen der Beleuchtung des Forschungsstandes wurden einige aktuelle Arbeiten vorgestellt, die die Leistung induktiver Sensoren, welche mit konkreten Anforderungen für spezielle Kontexte entwickelt wurden, veranschaulichen. Den Kern der Arbeit bildet die Auswahl an Kriterien,

anhand derer induktive Sensoren im Kontext des genannten Projektes miteinander verglichen werden können. Darauf aufbauend werden einige ausgewählte Sensoren miteinander in Bezug auf die ausgewählten Leistungsmerkmale verglichen.

Anhand der erhobenen Leistungsdaten der genannten Sensoren, lässt sich festhalten, dass verschiedene Modelle grundsätzlich in Betracht kommen. Um eine genauere Auswahl treffen zu können, sollten mögliche Einsatzszenarien entworfen werden.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass eine grobe Vorauswahl getroffen werden konnte. Die Menge potentieller induktiver Sensoren ließe sich allerdings durch eine rigorose Marktanalyse vergrößern und durch das durchspielen konkreter Einsatzszenarien exakter ausdünnen.

References

1. 3RG4012 Datenblatt, <https://www.tme.eu/Document/6afc305f8156fc14741ccf83957c865a/3RG4012-0AG01.pdf>
2. BI5U-M18-AP6X-H1141 Datenblatt, https://www.turck.de/datasheet/_en/edb1635140_gbr_en.pdf
3. GX-FL15AI Datenblatt, <https://www.digikey.de/de/products/detail/panasonic-industrial-automation-sales/GX-FL15AI/3896854>
4. IF5278 - Induktiver Sensor - ifm, <https://www.ifm.com/de/de/product/IF5278>
5. IMB18-08BPSVU2S Datenblatt, https://cdn.sick.com/media/pdf/5/55/555/dataSheet_IMB18-08BPSVU2S_072813_de.pdf
6. MIKROE-4783 Datenblatt, <https://www.mikroe.com/brochure?ref=MIKROE-4783>
7. Projektüberblick, <https://www.rescue-mate.de/about/>
8. Sturmflutschutz im Hamburger Hafen, https://www.hamburg-port-authority.de/fileadmin/user_upload/Broschuere_sturmflutschutz_Ansicht.pdf
9. Sturmflutschutz in Hamburg, <https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/2008/2299/pdf/sturmflutbroschuere.pdf>
10. Carullo, A., Parvis, M.: An ultrasonic sensor for distance measurement in automotive applications. *IEEE Sensors Journal* **1**(2), 143 (2001). <https://doi.org/10.1109/JSEN.2001.936931>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/936931/>
11. Farsi, R., Solmaz, N.S., Khosropour, N., Jacinto, B., Giroud, F., Boero, G.: 500 MHz high resolution proximity sensors with fully integrated digital counter. *Measurement* **217**, 113045 (Aug 2023). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113045>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224123006097>
12. Fonseca, J., Baptista, A., Martins, M., Torres, J.P.: Distance Measurement Systems Using Lasers and Their Applications. *Applied Physics Research* **9**, 33 (Jul 2017). <https://doi.org/10.5539/apr.v9n4p33>
13. Kejik, P., Kluser, C., Bischofberger, R., Popovic, R.S.: A low-cost inductive proximity sensor for industrial applications. *Sensors and Actuators A: Physical* **110**(1-3), 93–97 (Feb 2004). <https://doi.org/10.1016/j.sna.2003.07.007>, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924424703004151>
14. Leons, P., Yaghoubian, A., Cowan, G., Trajkovic, J., Nazon, Y., Abdi, S.: On improving the range of inductive proximity sensors for avionic applications. In: *Sixteenth International Symposium on Quality Electronic Design*. pp. 547–551 (Mar 2015). <https://doi.org/10.1109/ISQED.2015.7085485>, <https://ieeexplore.ieee.org/document/7085485/?arnumber=7085485>, iSSN: 1948-3295

15. Mizuno, T., Mizuguchi, T., Isono, Y., Fujii, T., Kishi, Y., Nakaya, K., Kasai, M., Shimizu, A.: Extending the Operating Distance of Inductive Proximity Sensor Using Magnetoplated Wire. *IEEE Transactions on Magnetics* **45**(10), 4463–4466 (Oct 2009). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2009.2021855>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/5257099/>
16. Ripka, P., Blažek, J., Mirzaei, M., Lipovský, P., Šmelko, M., Draganová, K.: Inductive Position and Speed Sensors. *Sensors* **20**(1), 65 (Dec 2019). <https://doi.org/10.3390/s20010065>, <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/1/65>
17. RoHS, E.: GADSL/IMDS China RoHS EU ELV Low-Halogen Status REACH SVHC
18. Tipler, P.A., Mosca, G.: *Physik: für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, Berlin, Heidelberg (2015). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-54166-7>, <https://link.springer.com/10.1007/978-3-642-54166-7>
19. Volpe, R., Ivlev, R.: A survey and experimental evaluation of proximity sensors for space robotics. In: *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 3466–3473. IEEE Comput. Soc. Press, San Diego, CA, USA (1994). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1994.351037>, <http://ieeexplore.ieee.org/document/351037/>
20. Ye, Y., Zhang, C., He, C., Wang, X., Jianjun, H., Deng, J.: A Review on Applications of Capacitive Displacement Sensing for Capacitive Proximity Sensor. *IEEE Access* **PP**, 1–1 (Mar 2020). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977716>
21. Zhang, P.: Sensors and actuators. In: *Advanced Industrial Control Technology*, pp. 73–116. Elsevier (2010). <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7807-6.10003-8>, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9781437778076100038>
22. Zhao, Y., Fang, Y., Yang, J., Zhang, W., Ge, X., Cao, S., Xia, X.: An Implementation Method for an Inductive Proximity Sensor with an Attenuation Coefficient of 1. *Energies* **13**(24), 6482 (Dec 2020). <https://doi.org/10.3390/en13246482>, <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/24/6482>